

Diseño e implementación de una estrategia de control predictivo para el secado de arroz paddy

Design and implementation of a strategy of predictive control of paddy rice drying

Alfonso Cubillos Varela, Oscar Barrero Mendoza*

Universidad de Ibagué, Barrio Ambalá, Cra 22 Calle 67, Ibagué, Colombia

(Recibido el 11 de diciembre de 2009. Aceptado el 1 de octubre de 2010)

Resumen

Este artículo trata sobre la modelación y control del proceso de secado de arroz Paddy en silo inclinado usando técnicas de control predictivo. Para esto se usa un secador a escala 1:10 con capacidad de 25 kilos de grano, totalmente instrumentado donde se puede medir en línea la temperatura y humedad del grano de arroz y del medio ambiente. Además, permite medir y manipular el flujo y temperatura del aire de secado. Con el fin de diseñar el controlador, primero se obtiene un modelo dinámico basado en el principio de capa delgada, luego se diseña e implementa la estrategia de control predictivo, conocida como DMC (Dynamic Matrix Control) la cual utiliza la respuesta paso y repuesta libre del sistema para calcular la acción de control óptima. Como consecuencia de este proceso se obtienen resultados prometedores del uso de este tipo de tecnología en el secado de arroz Paddy: a) reducción del tiempo de secado, b) evitar la pérdida de masa por sobresecado, c) garantizar un secado más homogéneo y por lo tanto una mejora en la calidad del arroz y la productividad de la industria molinera de la Región.

----- *Palabras clave:* Arroz paddy, control predictivo dmc, modelo capa delgada

Abstract

In this paper we present a Model Predictive Controller (MPC) implemented in a rice drying process with inclined silo. A pilot system is used at scale of 1:10, and capacity of 25 kg. In this system temperature and humidity of the rice grains are measured as well as air humidity. Additionally, the flow and temperature of drying air are controlled and measured. In order to design the controller a model based on thin layer and physical first principles is obtained and validated. Then, a MPC controller is designed based on this model. The type of MPC controller used is Dynamic Matrix Control (DMC) which uses

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 8 + 270 94 00 ext. 290, 374, correo electrónico: alfonso.cubillos@unibague.edu.co. (A. Cubillos)

the system step and free responses to estimate the next optimal control input. As a result, a good performance of the controller is obtained, showing that this is a promising technology that can be used in the Paddy rice drying process. The results show improvements in: a) reduction in drying time and energy consumption, b) over drying is avoided, c) the drying process is homogeneous, hence the quality of rice grains is better. Consequently, a positive impact on the productivity of the milling regional industry can be reached.

----- *Keywords:* Paddy rice, predictive control dmc, thin layer model

Introducción

El cultivo y procesamiento de arroz es una las labores agrícolas más importantes del departamento del Tolima, representando el 77% de la producción de arroz Paddy del país. Esta industria genera aproximadamente 4.500 empleos directos al año, y en el 2003 se cultivaron 498,486 hectáreas siendo de esta forma el tercer cultivo en extensión, después del café y el maíz.

La calidad molinera y su rendimiento se evalúan basados en la proporción del grano que permanece entero o en tres cuartos de su tamaño después de ser beneficiado. Esto se debe a que el valor comercial del grano partido se reduce hasta un 50% del valor del grano entero. Teniendo en cuenta que es la misma materia prima y los elevados volúmenes de producción (contados en millones de kilos mensualmente), pequeñas mejoras en la calidad del final grano tienen impactos significativos en la productividad de la empresa molinera. Cuando se realiza el proceso de molinería lo mejor es manejar métodos que arrojen un buen índice de pilado IP (alta masa de granos enteros) donde el estándar industrial obtiene índices con valores entre 53 y 57. Estos índices están determinados por factores ambientales y de manejo, tales como la cosecha, trilla, almacenamiento y especialmente *secado*.

El secado de arroz Paddy es uno de los procesos de mayor importancia en la producción de arroz blanco [1]. El secado influye también en la capacidad de almacenamiento del grano, el consumo de energía, la masa final del grano y el porcentaje de granos enteros al finalizar el

proceso. En la industria arrocera local, el proceso de secado se realiza a temperatura constante (aprox. 35°C), por el tiempo necesario hasta alcanzar la humedad de equilibrio. No alcanzar la humedad de equilibrio generará hongos en el proceso de almacenamiento, por otro lado, sobresecar el grano reduce la masa del producto generando pérdidas económicas para la industria molinera [2]. Además, realizar el proceso con una mayor temperatura fragiliza el grano generando un mayor porcentaje de granos partidos [3].

Materiales y métodos

En el proceso de modelización y diseño de cualquier controlador, es necesario realizar pruebas que permitan verificar el real comportamiento de los mismos. Sin embargo, para el caso del secado de arroz, realizar pruebas y experimentos en un secador industrial con 87.500 kilos de producto, es costoso, lento y hasta peligroso. Por lo tanto, se hace necesario utilizar un secador a escala que permita realizar estas pruebas de forma rápida y económica.

Por este motivo, la Universidad de Ibagué construyó un secador a escala 1:10, con capacidad para secar 25 Kilos de arroz paddy. La figura 1 muestra la geometría principal del secador utilizado para realizar las pruebas. El secador recibe aire caliente a temperatura y flujo controlado, y permite registrar la temperatura y humedad del aire ambiente que actúan como perturbaciones del proceso. Así mismo, se miden las condiciones del grano, temperatura y humedad, durante el proceso de secado.

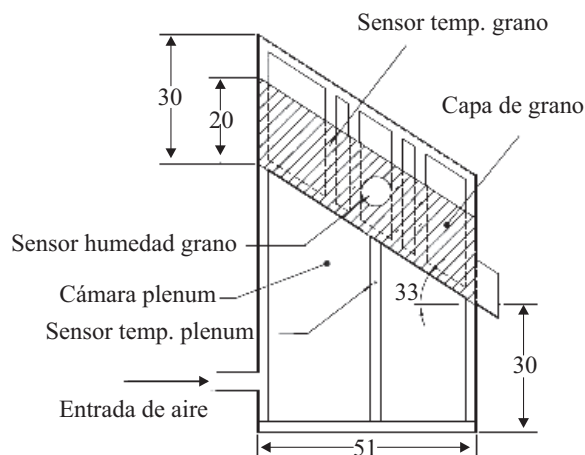


Figura 1 Modelo del secador y sus sensores (unidades en cm.)

Modelo de secado de arroz

Para el análisis de la evolución de las condiciones del aire y del grano (temperatura y humedad) durante el proceso de secado en capa profunda, se han desarrollado diferentes modelos matemáticos. Cada uno de los modelos se basa en un balance de agua elemental: El agua perdida por el grano es igual al agua ganada por el aire. Thompson and Foster, 1968) [4,5] desarrollaron un modelo matemático semiempírico que puede utilizarse para simular el secado de cualquier grano. El modelo realiza un balance de masa y energía, y considera la masa de granos de una capa gruesa como construida por capas delgadas de un grano de espesor, colocadas una sobre otras. Determinando el secado de una capa delgada, a través de balances de energía y masa, se puede estudiar el secado de la capa gruesa por medio de un proceso iterativo. De esta forma, se considera el lecho profundo de grano como una serie de capas delgadas de grano superpuestas, donde la temperatura de secado (T_s) y la humedad relativa (HR) del aire a la salida de una capa es la de entrada de la siguiente (ver figura 2).

El secado de una capa delgada se establece por medio de ecuaciones que considera los cambios de energía, humedad del grano y del aire de acuerdo a la figura 3.

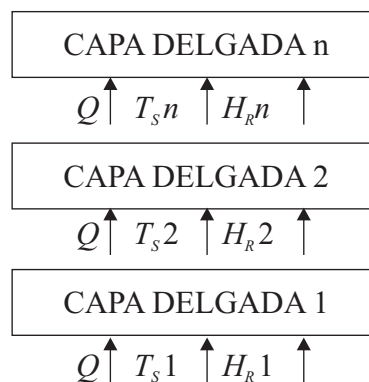


Figura 2 Simulación del secado de una capa gruesa de grano

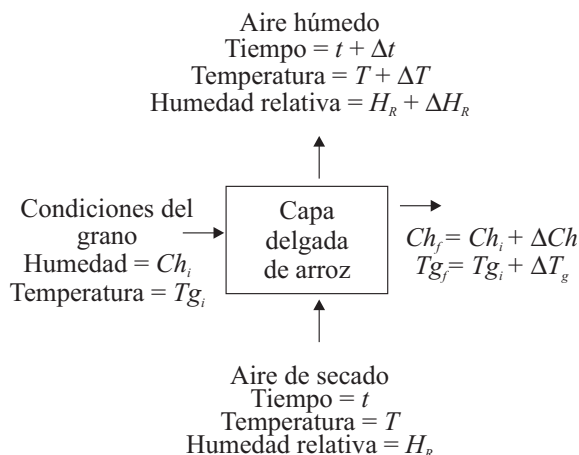


Figura 3 Diagrama esquemático del proceso de simulación (Thompson, 1970)

La figura 3 representa el paso de aire a una temperatura (T) y humedad relativa (HR) por una capa delgada de granos de espesor (dx), contenido de humedad (Ch) y temperatura (Tg), durante un intervalo de tiempo, t . En este intervalo de tiempo, cierta cantidad de humedad (ΔCh) se evapora de los granos y es llevada por el aire, que pasa a tener mayor humedad absoluta ($HR + \Delta HR$). Al mismo tiempo, el aire disminuye su temperatura ($T - \Delta T$) en forma proporcional al aumento de temperatura del grano, que va a incrementarse ($Tg + \Delta Tg$). Hay 4 variables dentro del sistema (T , HR , Tg y Ch) y por lo tanto se necesitan al menos 4 ecuaciones para su solución, estas son:

Ecuación de Humedad de equilibrio: La humedad de equilibrio, es la humedad que alcanza un producto cuando se deja un tiempo relativamente largo, expuesto a temperatura y humedad relativa constantes. Este se genera principalmente por el equilibrio de las presiones de vapor del grano y del aire ambiente. El contenido de humedad de equilibrio (M_{eq}), depende principalmente de la temperatura del aire de secado (T), y la humedad relativa del aire (H_R). Las constantes A, B, C, a_1, a_2, \dots , y a_9 se obtienen por experimentación y dependen del tipo de grano. Las siguientes, son las más utilizadas para arroz:

1. La ecuación de Henderson y Thompson [6] es de la forma

$$M_{eq} = \frac{\left(\frac{\ln(1 - H_R)}{-A(T + C)}\right)^{1/B}}{100} \quad (1)$$

2. La ecuación de Chung [7]

$$M_{eq} = B - A \ln(-(T - C) \ln(H_R)) \quad (2)$$

3. La ecuación de Roa [8]

$$M_{eq} = (a_1 H_R + a_2 H_R^2 + a_3 H_R^3) \cdot e^{(a_4 + a_5 H_R + a_6 H_R^2 + a_7 H_R^3 + a_8 H_R^4) \cdot (T + a_9)} \quad (3)$$

Ecuación de secado en capa delgada: Intenta definir matemáticamente el comportamiento de secado de una capa de granos basados en los mecanismos de difusión de masa, difusión térmica, flujos capilares y flujos hidrodinámicos.

La mayoría de las ecuaciones de capa delgada, se presentan en función del tiempo de exposición (t), de la humedad relativa (H_R), de la temperatura del aire de secado (T), y de algunas constantes experimentales que dependen del tipo de grano, (m, n, \dots). Otras ecuaciones, también utilizan la presión de saturación (P_{vs}), y la presión de vapor (P_v). Entre las principales ecuaciones de capa delgada, se encuentran:

- a) Fioreze y Roa (1976), para establecer los parámetros de las ecuaciones de secado

en capa delgada, implementaron un procedimiento dinámico con el uso de un equipo que proporciona las condiciones deseadas de temperatura y humedad relativa del aire que circula por la cámara de secado.

$$M_R = e^{-m(P_{vs} - P_v)^n t^q} \quad (4)$$

- b) La ecuación de Page [8] basada en un modelo empírico, donde k y h dependen de la temperatura y humedad del aire de secado

$$M_R = e^{-k \cdot t^h} \quad (5)$$

- c) La ecuación de Byler, se presenta como

$$M_R = m \cdot e^{n \cdot k \cdot t} + p \cdot e^{q \cdot k \cdot t} + r \cdot e^{s \cdot k \cdot t} \quad (6)$$

El parámetro M_R se conoce como relación de humedad y se utiliza para obtener la humedad final del grano (Ch_f) conociendo la humedad inicial (Ch_i), la humedad de equilibrio (M_{eq}) y el tiempo de secado (t) por medio de la ecuación de Wang-Singh [7].

$$M_R = \frac{Ch_f - M_{eq}}{Ch_i - M_{eq}} \quad (7)$$

Calor latente de vaporización: Para el arroz se define como la energía requerida para vaporizar la humedad contenida en el producto. Esta energía no es la misma al inicio y al final del secado, ya que si los contenidos de humedad del grano son bajos costara más extraer el agua del producto. El calor latente de vaporización (L), o entalpía de vaporización del producto, es función de la temperatura del grano (T_g) y del contenido de humedad del grano en base seca (Ch_{bs}). La ecuación de calor latente para de vaporización para el arroz determinada a partir de la expresión de Wang (1978) [7] para el arroz es

$$L = (1795,44 - 0,811 \cdot T_g) \cdot Ch_{bs}^{-0,346} \quad (8)$$

Ecuación de Calor Específico: Se define como la cantidad de calor expresada por las kilocalorías para aumentar la temperatura de un kilogramo de producto en un grado centígrado. El calor

específico de los alimentos puede ser expresado como la suma del calor específico de la materia seca y el agua asociada a esta materia seca. El calor específico (C_p) para el caso del arroz, se rige por el contenido de humedad del producto (Ch) en base seca.

$$C_p = 0,287 + 0,0091 Ch \quad (9)$$

Para las constantes de cada una de las ecuaciones previamente descritas, se encuentran parámetros diferentes dependiendo del lugar de origen del producto (Llanos orientales, Huila, California, Japón, Asia, etc). Es así como es necesario realizar diferentes pruebas para confirmar la validez de los modelos encontrados. En cada prueba, se seca arroz en el sistema a escala modificando las condiciones del aire de secado, y se registran las variables del grano así como las atmosféricas durante la prueba. Las condiciones del experimento (aire ambiente y aire de secado) son luego alimentadas a los diferentes modelos matemáticos. Cada modelo se crea utilizando una combinación diferente de ecuaciones y constantes (120 en total). El resultado de cada modelo se compara con el obtenido en la planta a escala.

La figura 4 resume el error medio cuadrado (RMSE) obtenido al combinar las diferentes ecuaciones de equilibrio con las ecuaciones de capa delgada. De esta figura se puede concluir que para el sistema a escala construido, el modelo que mejor se ajusta es aquel que utiliza la ecuación de equilibrio de Henderson y la ecuación de capa delgada de Page.

Las figuras 5 y 6, muestran el comportamiento de la humedad del grano, utilizando una temperatura de aire de secado de 35°C y 40°C respectivamente. La señal con ruido, representa la humedad del grano registrada por el sensor en la planta (el ruido, es un problema implícito del proceso de adquisición) y la línea discontinua se obtiene del *mejor* modelo de secado.

Estrategia clásica de secado

La industria molinera actual utiliza como estrategia de secado, aplicar temperatura constante

hasta alcanzar la humedad deseada. Este proceso es análogo a un controlador ON-OFF, el cual es aplicado al sistema a escala de laboratorio. El resultado se aprecia en la figura 7, donde se evidencia que el tiempo final para obtener la humedad deseada es de 15 horas aproximadamente. Además al realizar el análisis de laboratorio a este grano, se obtuvo un Índice de Pilado (IP) de 55,45.

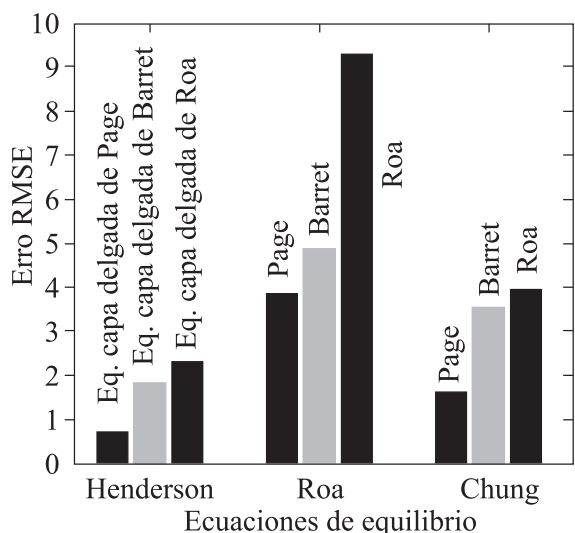


Figura 4 RMSE de los diferentes modelos a 35°C

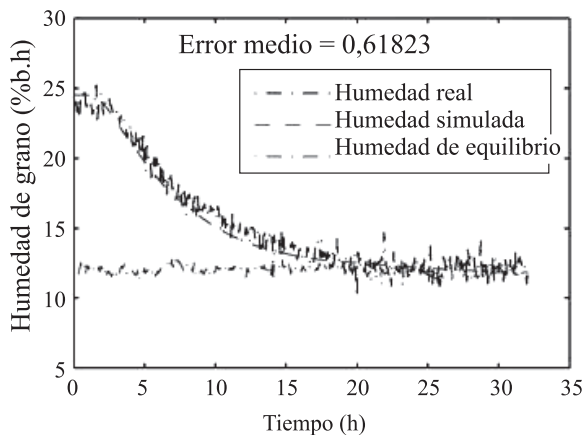


Figura 5 Prueba de secado de arroz a 35°C

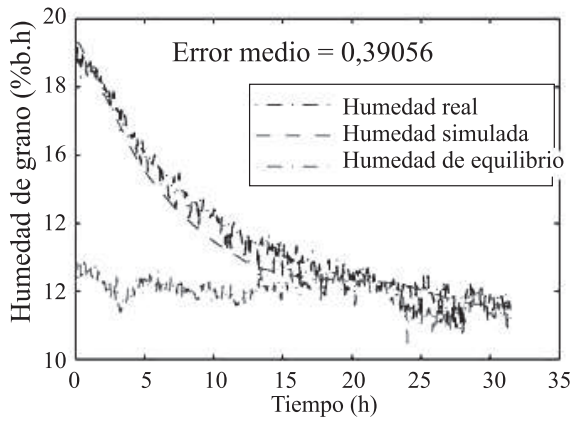


Figura 6 Prueba de secado de arroz a 40°C

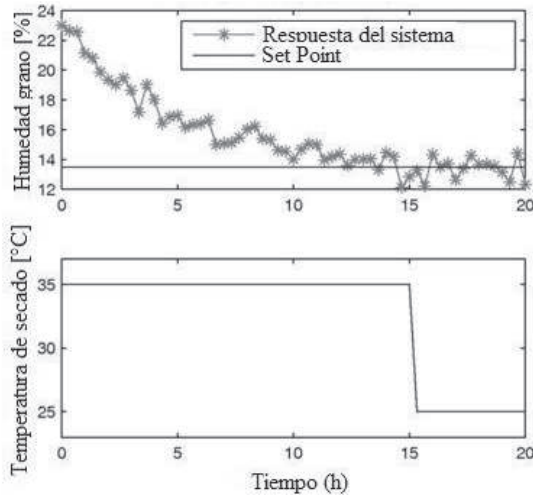


Figura 7 Respuesta del sistema ante la aplicación del control ON-OFF

Control predictivo de secado de arroz

El Control Predictivo basado en Modelos (MPC - Model Predictive Control) [9, 10], se refiere a la clase de algoritmos que calculan una secuencia de la variable manipulada, con el fin de optimizar el comportamiento futuro de la planta. Este método de control genera estrategias que básicamente poseen la misma estructura y los mismos elementos:

- Uso explícito de un modelo para predecir la evaluación del proceso en los instantes futuros

- Minimización de una función objetivo
- Utilización de un horizonte de control finito y deslizante que implica el cálculo de la secuencia de control para todo el horizonte pero con la aplicación del primer dato de la secuencia
- La repetición de todo el proceso en el siguiente instante de la muestra

El controlador DMC (Dynamic Matrix Control) usa un modelo de respuesta ante entrada escalón de tal forma que se captura la dinámica del proceso, mientras que las perturbaciones se consideran constantes a lo largo del horizonte.

El modelo de la respuesta escalón es de la forma de la ecuación. (10), donde $y(t)$ es la respuesta del sistema, son los coeficientes de la respuesta escalón, y son los cambios en la entrada:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t - i) \quad (10)$$

Donde los valores predichos de la salida a lo largo del horizonte serán

$$\hat{y}(t + k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t + k - i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t + k - i) + \hat{n}(t + k|t) \quad (11)$$

Dado que la perturbación actual, esta expresada en términos de la respuesta medida del sistema, la respuesta predicha del sistema; la predicción puede ser de la forma

$$\hat{y}(t + k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t + k - i) + f(t + k) \quad (12)$$

donde $f(t + k)$ es la respuesta libre del sistema, la cual no depende de las acciones de control futuras, y viene dada por,

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (g_{k+i} - g_i)\Delta u(t-i) \quad (13)$$

Si el proceso es asintóticamente estable los coeficientes de la respuesta ante escalón tienden a valores constantes tras un cierto número N de periodos de muestreo, y por lo tanto se puede calcular la respuesta libre como

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^N (g_{k+i} - g_i)\Delta u(t-i) \quad (14)$$

Ahora se pueden calcular las predicciones a lo largo del horizonte de predicción ($k = 1, \dots, p$), considerando m acciones de control:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+1|t) &= g_1\Delta u(t) + f(t+1) \\ \hat{y}(t+2|t) &= g_2\Delta u(t) + g_1\Delta u(t+1) + f(t+2) \\ &\vdots \\ \hat{y}(t+p|t) &= \sum_{i=p-m+1}^p g_i\Delta u(t+p-i) + f(t+p) \end{aligned} \quad (15)$$

Si se define la *matriz dinámica* del sistema G (que da nombre al algoritmo) como

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_m & g_{m-1} & \cdots & g_i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \cdots & g_{p-m+1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

se puede escribir la predicción como

$$\hat{y} = G \cdot u + f \quad (17)$$

La *función objetivo* cuadrática incluye el esfuerzo de control, y es de la forma

$$J = ee^T + \lambda uu^T \quad (18)$$

donde e es el vector de errores futuros a lo largo del horizonte.

La *acción de control* se puede obtener de forma analítica (en el caso de modelos lineales), igualando a cero la derivada de J , proporcionando

$$u = K(w - f) \quad (19)$$

Donde representa el incremento proporcional de la señal de control a los errores futuros y por tanto habrá cambios en la señal de control siempre que el controlador detecte que va a haber una discrepancia en el futuro entre el objetivo deseado y el comportamiento esperado del sistema.

La implementación de la estrategia de control predictivo en el sistema se resume en la figura 8. En esta figura se representan dos funciones de Matlab: “Repuesta Libre” y “Respuesta Paso” que calculan la salida predicha (f) y la matriz dinámica (G), respectivamente, utilizando el modelo no lineal obtenido en la sección anterior y las perturbaciones actuales medidas por el sistema. De esta forma se obtiene el comportamiento lineal del proceso. Es necesario realizar este cálculo en línea con el proceso a fin de tener en cuenta los cambios, generalmente bruscos, de la temperatura y humedad del ambiente que afectan drásticamente el proceso que se asumen como perturbaciones. Con la salida predicha y la trayectoria de referencia, se calcula el error futuro; y con la matriz dinámica G , se utiliza la

función “Optimizador” para calcular la siguiente entrada al proceso (u). Este valor de control se envía al “Secador” real y después de un periodo de tiempo específico, se leen de nuevo las señales del sistema (perturbaciones) y se calcula la nueva respuesta libre y respuesta paso para repetir el ciclo.

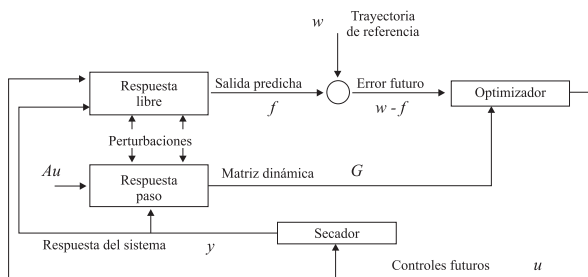


Figura 8 Diagrama esquemático del proceso de control predictivo en el secado de arroz

Validación del controlador dmc

La figura 9, muestra la respuesta del sistema con una curva de referencia tipo exponencial con tiempo de establecimiento de 10 horas. En esta figura se aprecia como la temperatura de secado, primero aumenta por un corto tiempo para aumentar la velocidad de secado; para luego descender lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiente, reduciendo así los cambios bruscos de temperatura. Siguiendo de esta forma las recomendaciones planteadas en el secado para mejorar la calidad del grano y reducir las fisuras generadas en el proceso.

Al aplicar la prueba de calidad de molinería a el grano obtenido por esta estrategia de control, se obtuvo un índice de pilado de 57,2.

Discusión y conclusiones

Se demuestra que el control predictivo de secado de arroz es una técnica que permite reducir el tiempo de secado y alcanzar la humedad final deseada. Esto le permitiría a las empresas molineras que utilizan secador de lecho fijo de piso perforado, mejorar su productividad al reducir tiempo en el proceso de secado, y evitar

la pérdida de masa por sobresecado sin afectar las condiciones de almacenamiento del grano. Se presenta de esta forma un modelo y controlador que son implementables en industrias de la región y que demuestra sus potencialidades. Así mismo, se demuestra que la calidad del grano mejora al utilizar el control predictivo DMC (IP : 57,2), que al utilizar el clásico método de secado ON-OFF (IP : 55,45). Este aumento en el IP de 1.75 podría generarle a una industria molinera un incremento en sus ingresos de aproximadamente el 3%.

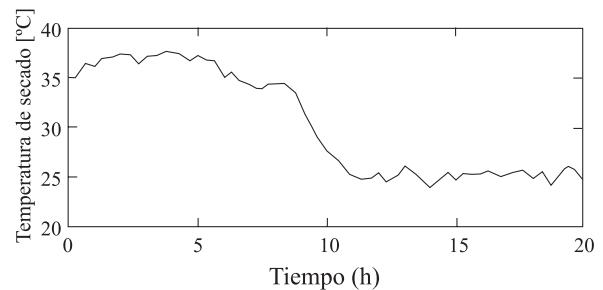
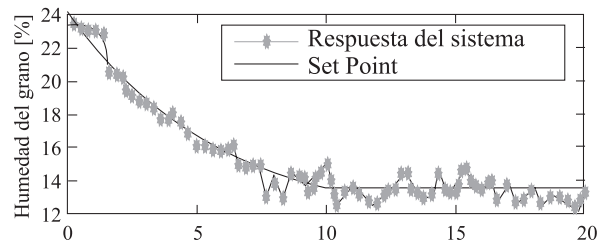


Figura 9 Respuesta del sistema a la aplicación del control predictivo

El control predictivo basado en modelos (MPC), utilizando la metodología DMC (Dynamic Matrix Control), se presenta como una estrategia efectiva para el control de secado de arroz. La cual permite reducir los efectos de la perturbación debidos a los cambios en la humedad y temperatura del ambiente.

El modelo de secado utilizando el concepto de capa delgada, humedad de equilibrio, transferencia de masa y energía, demuestra ser una estrategia que permite predecir el comportamiento del grano en este tipo secador. Este modelo también permitió demostrar científicamente algunos efectos percibidos de forma empírica por los molineros, tal es el caso principalmente de las causas y

efectos de la humedad de equilibrio sobre el almacenamiento y rendimientos de masa en el grano.

La generación de nuevos modelos y estrategias de control, son proyectos que se pueden plantear y desarrollar gracias no solo al secador a escala construido, sino también a los modelos y algoritmos desarrollados en el presente trabajo.

Entre los principales problemas a resolver, esta la determinación y definición de curvas de secado que reduzcan la cantidad de grano partido. Pues el presente trabajo generó como referencia curvas de secado diferentes sin estudiar su relación con la calidad final del grano.

También el desarrollo de modelos de secado que se adapten a las condiciones de la planta, del grano, ambientales y otras, se presenta como posibles trabajos futuros. La ventaja de la aplicación del control predictivo es que la estrategia puede ser la misma, aunque el modelo se modifique o se ajuste a condiciones nuevas o cambiantes.

Se propone además, utilizar este trabajo como base para la implementación industrial, pues los resultados son verificables y aplicables a la industria molinera de la Región.

Referencias

1. A. Ciro. *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1999. pp .13
2. A. Castillo, J. Gaviria. *Molinería de Arroz en los Tropicos*. 2ª ed. Ed. Ediagro Ltda. Bogotá. Colombia. 2000. pp. 33- 108.
3. W. Yang, A. G.Cnossen, T. J. Siebenmorgen. "The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect on drying rate". *Transactions of the ASAE*. Vol. 45. 2002. pp. 753-766.
4. C. A. Abel. *Determinación de parámetros y simulación matemática del secado de arroz*. Trabajo de Grado. Universidad Surcolombiana. Neiva – Huila. 1986. pp. 76-82
5. C. Jia. "Mathematical modeling and glass transition mapping for rice drying in a cross-flow dryer". *Transactions of the ASAE*. Paper Number. 02-6073. 2002. pp. 2-7.
6. J. A. Ramírez, G. A. Lozano. *Desarrollo de un software para el diseño y evaluación de costos de sistemas de secado estático para granos*. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1999. pp. 50-57
7. M. L. Marqués. *Modelización de la Operación de secado de malta, por aire caliente, en lecho fijo y capa profunda*. MS Thesis. Universitat de Lleida, Salamanca. España. 2000. pp. 24-31.
8. C. Page. *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. MS Thesis. Purdue University. Lafayette. IN. 1949. pp. 32
9. E. F. Camacho, C. Bordons. *Model Predictive Control*. 2ª. Ed. Ed. Springer-Verlag. London. 2004. pp. 405.
10. J. A. Rossiter. *Model-Based Predictive control: A practical approach*. Ed. CRC. Boca Raton. Florida. pp. 71.